基于气相色谱-离子迁移谱解析不同基质原料制备发酵乳挥发性风味成分差异

戴缘缘[1]，孟　飞[1]，谢小花[1]，陈　静[1]，胡晓沛[2,3,*]
（1.滁州职业技术学院食品与环境工程学院，安徽 滁州　239000；2.沈阳农业大学食品学院，辽宁 沈阳　110866；
3.沈阳市粮油营养资源挖掘与品质调控重点实验室，辽宁 沈阳　110866）

摘　要：为探究不同基质原料（牛乳粉、牛乳粉＋芡实粉、芡实粉）对其制备发酵乳挥发性风味成分的影响，通过感官评价结合气相色谱-离子迁移谱技术解析牛乳基发酵乳、芡实牛乳基发酵乳和芡实基发酵乳感官品质及挥发性风味成分差异，并对挥发性风味成分进行指纹图谱比对分析、层次聚类分析（hierarchical cluster analysis，HCA）、主成分分析（principal component analysis，PCA）及正交偏最小二乘判别分析（orthogonal partial least squares-discriminant analysis，OPLS-DA）。结果表明，芡实基发酵乳的感官评分最高（（92.50±1.08）分）。3种发酵乳共检出51种挥发性风味化合物，包括酮类12种、醇类14种、醛类11种、酯类5种、酸类2种及其他类7种。指纹图谱、HCA及PCA反映3种发酵乳挥发性风味成分存在明显差异，PCA和OPLS-DA可以有效区分3种发酵乳。根据变量投影重要性（variable importance in projection，VIP）值和方差分析*P*值筛选出18种关键差异物质（VIP＞1、*P*＜0.05），主要为酮类（7种）、醇类（3种）、醛类（4种）、吡嗪类（2种）、酸类（1种）和酯类（1种）。该研究结果可为解析不同基质原料发酵乳挥发性香气特征提供科学依据。

关键词：脱脂奶粉；芡实粉；基质原料；发酵乳；感官评价；气相色谱-离子迁移谱；挥发性风味成分；差异分析

Analysis of the Differences of Volatile Flavor Components of Fermented Milk Prepared with Different Substrate Materials Based on Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry

DAI Yuanyuan[1], MENG Fei[1], XIE Xiaohua[1], CHEN Jing[1], HU Xiaopei[2,3,*]
(1. School of Food and Environmental Engineering, Chuzhou Polytechnic, Chuzhou　239000, China;
2. Food Science College, Shenyang Agricultural University, Shenyang　110866, China;
3. Shenyang Key Laboratory for Nutritional Resources & Quality Control of Grain and Oil, Shenyang　110866, China)

Abstract: To investigate the effects of different substrate raw materials (milk powder, milk powder + *Euryale ferox* powder, *E. ferox* powder) on the volatile flavor components of the fermented milk produced by them, the milk-based fermented milk, milk with *E. ferox*-based fermented milk and *E. ferox*-based fermented milk were analyzed using sensory evaluation combined with gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) technology. Fingerprint chromatogram comparison analysis, hierarchical cluster analysis (HCA), principal component analysis (PCA) and orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) were conducted on volatile flavor components. The results showed that *E. ferox*-based fermented milk achieved the highest sensory score (92.50 ± 1.08). A total of 51 volatile flavor components were detected in the three types of fermented milk, including 12 ketones, 14 alcohols, 11 aldehydes, 5 esters, 2 acids, and 7 others. Significant differences in volatile flavor components were revealed by fingerprint profiles, HCA and PCA among the three fermented milk samples. The three types of fermented milk could be effectively distinguished by PCA and OPLS-DA. A total of 18 key differential components were screened out through variable importance in projection (VIP) > 1 and $P < 0.05$, including 7 ketones, 3 alcohols, 4 aldehydes, 2 pyrazines, 1 acid, and 1 ester. This study provides a scientific basis for analyzing the volatile aroma characteristics of fermented milk produced from different substrate materials.

Keywords: skim milk powder; *Euryale ferox* powder; substrate materials; fermented milk; sensory evaluation; gas chromatography-ion mobility spectrometry; volatile flavor component; differential analysis

收稿日期：2025-11-18
基金项目：安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目（gxyqZD2022127）；滁州职业技术学院科研平台项目（YJP-2023-01）；辽宁省教育厅面上项目（LJKMZ20221062）
第一作者简介：戴缘缘（1991—），女，讲师，硕士，研究方向为食品科学。E-mail: 380617387@qq.com
*通信作者简介：胡晓沛（1989—），女，讲师，博士，研究方向为粮油精深加工。E-mail: huxp1006@syau.edu.cn

DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.036
中图分类号：TS252.54 文献标志码：A 文章编号：0254-5071（2026）05-0273-09
引文格式：
戴缘缘, 孟飞, 谢小花, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱解析不同基质原料制备发酵乳挥发性风味成分差异[J]. 中国酿造, 2026, 45(5): 273-281. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.036. http://www.chinabrewing.net.cn
DAI Yuanyuan, MENG Fei, XIE Xiaohua, et al. Analysis of the differences of volatile flavor components of fermented milk prepared with different substrate materials based on gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. China Brewing, 2026, 45(5): 273-281. (in Chinese with English abstract) DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.036. http://www.chinabrewing.net.cn

发酵乳是以生牛（羊）乳或乳粉为原料，经杀菌、发酵后制成的低pH值产品。发酵乳中富含蛋白质、活性肽、脂肪、脂溶性维生素、矿物质等成分，营养丰富且易于吸收，同时较高数量和活性的益生菌具有改善肠道功能、缓解便秘的功效[1-2]。在大健康时代背景下，植物基发酵乳因具有高膳食纤维、低饱和脂肪酸、低胆固醇、无乳糖等成分优势[3-4]，越来越受到消化系统疾病人群、心血管疾病人群和乳糖不耐受人群的青睐。目前，植物基发酵乳常用原料有豆类、坚果类、谷物类、种子类等[5]，虽然在欧美市场上已经受到主流消费者认可，但我国消费者接受度并不高[6]，其中很大原因在于植物原料本身[7]及发酵过程中产生的不良风味[8]，而且产品种类较单一。因此，不断丰富品类、改善品质是适应当下植物基发酵乳市场快速发展亟需解决的问题。

芡实（*Euryale ferox*），又名鸡头果，是典型的淀粉基食材，也是常见的药食同源食材。芡实的淀粉含量高且以超聚合的复粒形式存在，具有低血糖生成指数的特性[9]。芡实中还含有多酚、芡实素、膳食纤维等活性成分[10-12]，具有抗氧化、淀粉酶活性抑制及降血脂能力等。马恺阳等[13]利用淀粉质丰富的燕麦全粉制备燕麦植物基酸奶，结果表明，经酶解发酵后的燕麦植物基酸奶保留了燕麦的*β*-葡聚糖，具有较好的流变特性，产品部分理化指标及营养成分高于搅拌型酸奶，证明工艺优化较为成功。Coda等[14]通过淀粉糊化增加发酵前植物成分的黏度，从而改善植物基酸乳的质地。付荣霞等[15]以山药、薏米、芡实为原料制作褐色酸奶，产品酸味甜度合适、风味独特、口感细腻，并具有一定的营养价值。王倩等[16]以奶粉为主要原料，添加芡实粉发酵制作凝固型酸奶。结果表明，动态精准微流控处理的芡实粉添加量为1%时，酸奶的持水力明显提升，脱水收缩作用降低，乳清析出现象减少，所制备的凝固型酸奶口感细腻，组织结构得到改善。因此，利用乳酸菌发酵芡实制备植物基发酵乳是有效的加工手段，不仅有利于增加功效还有利于改善风味。

气相色谱-离子迁移谱（gas chromatography-ion mobility spectrometry，GC-IMS）可以有效检测出保留时间相近但迁移时间不同的挥发性成分，而且GC-IMS对食品中含高电负性或高质子亲和力基团的风味物质检测灵敏度很高[17]。目前已有不少学者将GC-IMS技术应用于不同类型发酵乳挥发性物质差异分析[18-19]，但尚鲜见该技术应用于芡实发酵乳制品风味成分分析的报道。本研究以不同基质原料（牛乳粉、牛乳粉＋芡实粉、芡实粉）制备发酵乳，通过感官评价结合GC-IMS技术解析牛乳基发酵乳、芡实牛乳基发酵乳和芡实基发酵乳感官品质及挥发性风味成分，并对挥发性风味成分进行指纹图谱比对分析、层次聚类分析（hierarchical cluster analysis，HCA）、主成分分析（principal component analysis，PCA）及正交偏最小二乘判别分析（orthogonal partial least squares-discriminant analysis，OPLS-DA），旨在探究不同基质原料对发酵乳挥发性风味成分的影响，以期为植物基发酵乳深加工奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

芡实（淀粉83.54%、蛋白质11.82%、脂肪0.38%、灰分1.74%） 天长市龙岗芡实专业合作社；乳双歧杆菌（*Bifidobacterium lactis*）、保加利亚乳杆菌（*Lactobacillus bulgaricus*）、嗜热链球菌（*Streptococcus thermophilus*）、干酪乳杆菌（*Lactobacillus casei*）及植物乳植杆菌（*Lactiplantibacillus plantarum*）混菌发酵剂（1∶1∶1∶1∶1）（活菌数10^9 CFU/g） 北京川秀科技有限公司；安佳脱脂乳粉（蛋白质32.9%、脂肪0.9%、乳糖54.5%） 恒天然商贸（上海）有限公司；白砂糖 安琪酵母股份有限公司。

1.2 仪器与设备

FlavourSpec® GC-IMS仪（配有VOCal 0.4.03数据处理软件） 德国G.A.S.公司；FSJ-A05N6型粉碎机 广东小熊电器股份有限公司；BJPX-HT150型恒温恒湿培养箱、BJPX-WB26型恒温水箱 山东博科科学仪器有限公司；FD29A型立式自动压力蒸汽灭菌器 致微（厦门）仪器有限公司。

1.3　方法

1.3.1　不同基质原料发酵乳的制备

1.3.1.1　牛乳基发酵乳的制备

称取20 g脱脂乳粉，按照料液比1∶5（g/mL）加入蒸馏水，得到复原乳。复原乳于95 ℃灭菌5 min，冷却至42 ℃左右添加4%白砂糖，按前期预实验确定的0.19%接种量接入乳酸菌混菌发酵剂，混匀后于41 ℃条件下恒温密封发酵7.95 h至完全凝固，终止发酵后在4 ℃条件下后熟24 h，即得牛乳基发酵乳（样品编号为A）。

1.3.1.2　芡实牛乳基发酵乳的制备

芡实经粉碎机粉碎后过60目筛，得到芡实粉，备用。

称取4 g脱脂乳粉，按照1∶4质量比添加芡实粉，按照料液比1∶5（g/mL）加入蒸馏水，得到芡实牛乳混合料，按照牛乳基发酵乳的制备工艺及操作参数制备芡实牛乳基发酵乳（样品编号为B）。

1.3.1.3　芡实基发酵乳的制备

称取20 g芡实粉，按照料液比1∶5（g/mL）加入蒸馏水，得到芡实乳。按照牛乳基发酵乳的制备工艺及操作参数制备芡实基发酵乳（样品编号为C）。

1.3.2　感官评价

参考GB 19302—2025《食品安全国家标准 发酵乳》[20]中感官评价方法，由10位专业人员组成评价小组对不同基质原料制备的发酵乳按照色泽、滋味、气味及组织状态等方面进行感官评分，具体评分标准见表1。

表1　不同基质原料制备发酵乳感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation criteria of fermented milk prepared with different substrate materials

项目（分值）	评分标准	评分
色泽（20）	色泽均匀、无杂色，有光泽，呈乳白色或浅褐色	16～20
	色泽均匀、无杂色，无光泽，呈灰白色或褐色	11～15
	色泽不均匀，有明显色斑	0～10
滋味（30）	酸甜适中，有明显基质原料特征滋味	26～30
	略酸或略甜，稍有基质原料特征滋味	16～25
	过酸或过甜，无基质原料特征滋味	0～15
气味（20）	有浓郁的基质原料香味，无异味	16～20
	有淡淡的基质原料香味，无异味	11～15
	无基质原料香味，有明显异味	0～10
组织状态（30）	组织均匀，无粗糙颗粒感，无上清液析出	26～30
	轻微的粉末质感，少量上清液析出	16～25
	质地粗糙、粉质感明显，大量上清液析出	0～15

1.3.3　不同基质原料发酵乳中挥发性风味物质GC-IMS分析

样品前处理：分别称取3 g不同基质原料发酵乳于顶空瓶中，经55 ℃处理20 min后进样，进样针温度为85 ℃。每份样品各设置3组平行。

GC条件：采用FS-SE-54-CB-1毛细管色谱柱（15 m×0.53 mm，1 μm），柱温60 ℃，进样量500 μL，不分流进样，载气为高纯氮气，载气流量程序为0～2 min保持2 mL/min；2～10 min线性升至10 mL/min；10～20 min线性升至100 mL/min；20～50 min保持100 mL/min，总运行时间 50 min。

IMS条件：IMS温度45 ℃；漂移气和载气均为高纯氮气，其中漂移气流速75.0 mL/min。被分析物在60 ℃条件下洗脱分离，然后在IMS电离室中采用^{3}H电离源（活性300 MBq）在正离子模式下电离。9.8 cm漂移管在45 ℃恒压（5 kV）下运行。

定性定量分析：保留指数（retention index，RI）的计算采用自动质谱反褶积鉴定系统进行。通过比对NIST和信息管理系统数据库的RI和保留时间（retention time，RT）对目标物进行定性分析。通过峰体积进行定量分析。

1.4　数据处理

利用VOCal 1.0.3软件构建指纹图谱、GC-IMS三维图谱及二维对比图谱。采用R语言factoextra包进行PCA，采用SIMCA 14.1软件进行OPLS-DA，并计算预测变量重要性投影（variable importance in projection，VIP）值；采用Origin 2024绘制堆积环形图和聚类分析热图；通过SPSS 27.0软件进行显著性分析。

2　结果与分析

2.1　不同基质原料制备发酵乳感官评价结果

由表2可知，样品C感官评分最高，为（92.50±1.08）分，样品B感官评分为（87.13±1.16）分，样品A感官评分为（85.74±0.88）分。这与郑丽敏等[21]研究结果相吻合。芡实作为基质原料，在发酵中既保留部分植物原有的芳香，又利用乳酸菌产生酸类、醇类、酮类、醛类等风味物质，增加了奶香味、水果味及麦芽香气[22-25]，使得整体风味更加丰富。结果表明，芡实基发酵乳（样品C）的感官品质最佳。

表2　不同基质原料制备发酵乳感官评分

Table 2　Sensory scores of fermented milk prepared with different substrate materials

样品编号	色泽	滋味	气味	组织状态	感官评分
A	16.70±0.79	25.85±0.67	16.24±0.42	26.95±0.60	85.74±0.88
B	16.85±0.47	27.35±0.47	17.58±0.50	25.35±0.67	87.13±1.16
C	18.00±0.82	27.80±0.79	18.20±0.79	28.50±0.53	92.50±1.08

2.2　不同基质原料制备发酵乳挥发性风味成分GC-IMS图谱分析

2.2.1　挥发性风味成分GC-IMS色谱图

不同基质原料制备发酵乳样品挥发性风味成分GC-IMS三维及二维谱图见图1。

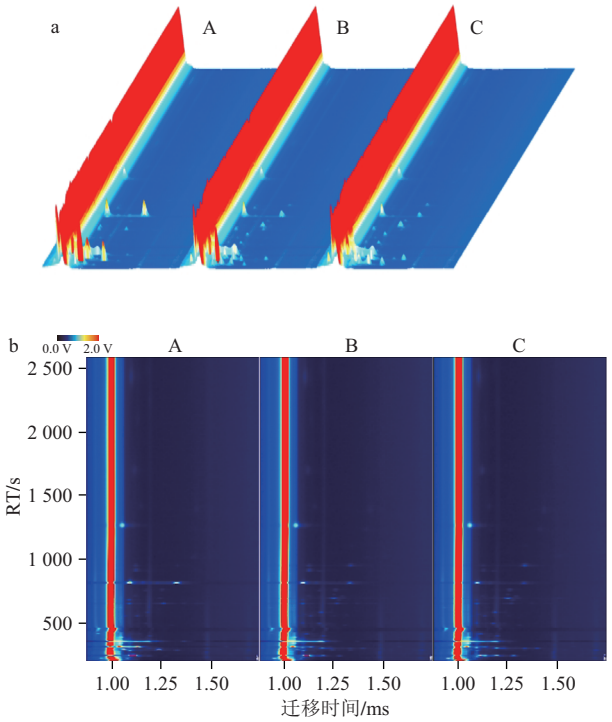


图 1　不同基质原料制备发酵乳挥发性风味成分GC-IMS三维（a）及二维（b）图谱

Fig. 1　Three-dimensional (a) and two-dimensional (b) GC-IMS spectra of volatile flavor components in fermented milk prepared with different substrate materials

由图1a可知，谱图的水平方向代表离子迁移时间，竖直方向代表保留时间，垂直方向代表峰强度，反应离子峰两侧的各点分别对应一种挥发性有机物，且颜色由白到红，色泽越深则表示该化合物的含量越高[24]。不同基质原料的发酵乳信号峰强度及密集程度不同，表明样品A、B、C之间挥发性风味成分组成有明显差异。由图1b可知，3种基质原料制备发酵乳中大多数挥发性化合物RT在200～1 500 s之间，迁移时间在1.00～1.50 ms之间。不同基质原料制备发酵乳信号离子峰形成的光斑具有明显差异性，表明样品A、B、C中同一化合物含量存在较大差异。

选取样品A作为参比，样品B、C扣除参比后的GC-IMS二维谱图见图2。背景由蓝色变成白色，图中每个点代表一种挥发性化合物，样品中挥发性物质含量高于参比则为红色，反之则为蓝色[26]。

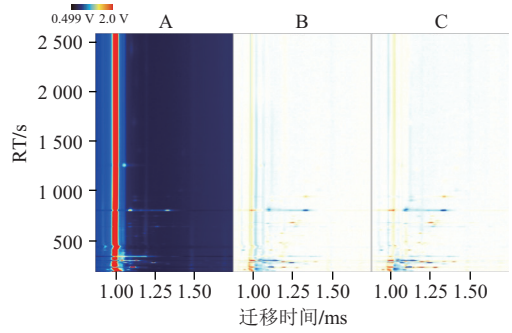


图 2　不同基质原料制备发酵乳挥发性风味成分GC-IMS差异谱图

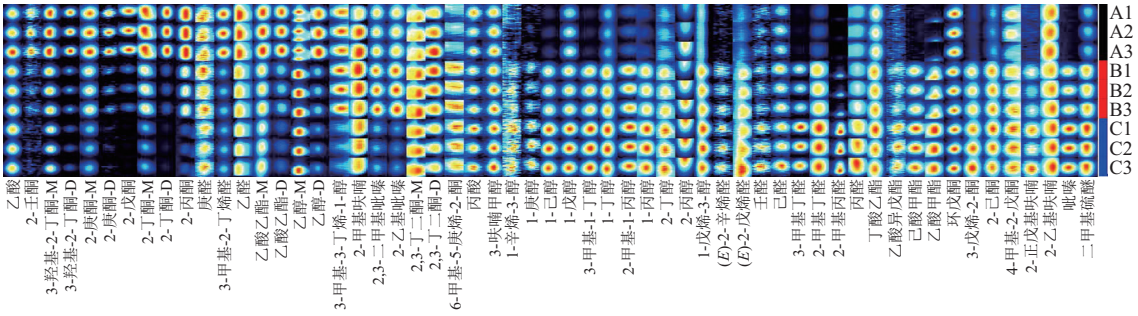
Fig. 2　Differential GC-IMS spectra of volatile flavor components in fermented milk prepared with different substrate materials

由图2可知，随着发酵基质原料中芡实含量的增加，图谱中红斑区域也逐渐增加，表明芡实基发酵乳（样品C）挥发性风味物质含量明显高于样品A和B，但是也有一部分蓝色斑点，表明有些挥发性风味物质含量低于样品A和B。

2.2.2　挥发性风味成分GC-IMS指纹谱图

对不同基质原料制备发酵乳中挥发性风味物质进行GC-IMS指纹图谱比对分析，将各自的特征峰区域可视化，结果见图3。

由图3可知，样品A与其他2种发酵乳挥发性风味物质差异明显，样品B和C挥发性风味物质亮斑分布较为相似，但亮斑颜色存在明显差异，表明这2种发酵乳香气类型相似，但香味物质含量差别较大。样品A中乙酸、2-壬酮、3-羟基-2-丁酮、2-庚酮、庚醛、乙醛、乙酸乙酯、乙醇等物质的含量较高，其中2-庚酮能赋予乳制品奶油香、甜香和果香[27]，减弱刺激性味道。样品B中3-甲基-3-丁烯-1-醇、2-甲基呋喃、2,3-二甲基吡嗪、2,3-丁二酮等物质的含量较高。样品C中丙酸、(*E*)-2-辛烯醛、壬醛、己醛、3-甲基丁醛、丙醛、丁酸乙酯、乙酸异戊酯、己酸甲酯、乙酸甲酯、环戊酮、3-戊烯-2-酮、2-己酮、



M、D.分别为同一个物质的单体和二聚体。

图 3　不同基质原料制备发酵乳挥发性风味成分GC-IMS指纹图谱

Fig. 3　GC-IMS fingerprint of volatile flavor components in fermented milk prepared with different substrate materials

4-甲基-2-戊酮、2-正戊基呋喃、吡嗪、二甲基硫醚等物质的含量较高。其中3-戊烯-2-酮和2-己酮呈果香，4-甲基-2-戊酮呈酮样香味，环戊酮具有令人愉悦气味，乙酸异戊酯具有愉悦甜香味、香蕉味（气味描述主要来源于网站http://www.odour.org.uk），(*E*)-2-辛烯醛具有特有的脂肪香味[28]，这些风味物质共同参与形成芡实基发酵乳的独有风味，并使其整体风味更加丰厚。

2.3　不同基质原料制备发酵乳挥发性成分GC-IMS分析结果

由表3可知，3种发酵乳样品中共鉴定出挥发性风味物质51种，有些化合物具有二聚体因此共57个峰，包括酮类12种（二聚体4个）、醇类14种（二聚体1个）、醛类11种、酯类5种（二聚体1个）、酸类2种及其他类7种。样品A、样品B和样品C中均检测出该51种挥发性风味物质。

表 3　不同基质原料制备发酵乳中挥发性风味成分GC-IMS分析结果

Table 3　GC-IMS analysis results of volatile flavor components in fermented milk prepared with different substrate materials

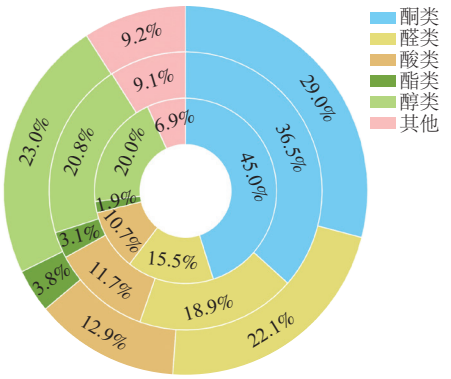
类别	化合物	CAS号	RI	RT/s	迁移时间/ms	峰体积			*P*值
						A	B	C	
酮类	2-壬酮	C821556	1 402.9	1 015.632	1.409 51	140.705 118.725 118.727	114.377 108.102 104.365	85.109 86.311 87.651	0.07
	3-羟基-2-丁酮	C513860	1 302.3	817.234	1.086 19	2 799.510 2 782.201 2 864.726	1 913.532 1 932.586 1 932.473	1 594.144 1 568.275 1 565.502	**
	3-羟基-2-丁酮（二聚体）	C513860	1 302.3	817.234	1.332 41	2 064.782 2 039.549 2 235.950	796.834 806.748 788.218	523.451 508.394 500.111	**
	环戊酮	C120923	1 192.0	652.130	1.094 50	237.990 245.217 231.173	239.458 249.385 252.820	255.011 274.210 283.115	**
	2-庚酮	C110430	1 195.4	656.622	1.266 88	240.129 249.121 243.969	174.206 178.838 180.456	111.824 108.360 105.276	**
	2-庚酮（二聚体）	C110430	1 195.4	656.622	1.624 02	38.786 40.553 39.861	29.923 31.416 33.563	26.968 22.969 22.147	*
	2,3-丁二酮	C431038	1 001.4	357.400	1.042 72	2 711.077 2 675.308 2 647.700	2 842.166 2 890.155 2 915.001	2 826.165 2 803.669 2 776.625	**
	2,3-丁二酮（二聚体）	C431038	1 000.7	356.741	1.186 43	1 545.444 1 723.544 1 939.029	1 821.464 1 755.221 1 746.940	1 417.776 1 410.724 1 358.238	*
	2-戊酮	C107879	1 000.2	356.179	1.365 89	95.478 95.647 91.132	38.953 35.094 37.418	16.632 17.959 16.297	**
	2-丁酮	C78933	915.1	294.927	1.068 21	909.120 917.456 911.442	575.428 579.414 593.893	340.458 339.644 337.649	**
	2-丁酮（二聚体）	C78933	915.1	294.927	1.245 55	1 085.332 1 090.749 1 121.197	249.612 244.149 253.389	86.720 93.316 89.604	**
	2-丙酮	C67641	838.1	249.267	1.111 90	4 637.924 4 680.314 4 759.719	2 659.253 2 669.096 2 704.771	1 162.296 1 193.170 1 205.473	**
	6-甲基-5-庚烯-2-酮	C110930	1 350.3	906.491	1.175 77	40.673 38.733 38.855	53.328 57.698 54.219	45.263 51.000 51.293	**
	3-戊烯-2-酮	C625332	1 117.2	504.656	1.096 18	34.671 42.183 40.050	100.695 103.323 105.812	117.721 125.128 137.741	**
	2-己酮	C591786	1 101.2	477.732	1.198 31	45.232 49.004 356 49.753 11	88.443 79.476 555 80.438 6	88.155 82.204 94 83.669 12	**
	4-甲基-2-戊酮	C108101	1 027.7	385.618	1.183 92	37.071 35.707 30.357	44.376 37.007 38.717	41.799 39.306 37.036	*
	3-呋喃甲醇	C4412913	1 798.9	2 389.327	1.107 45	1 334.080 1 308.765 1 351.146	1 396.495 1 403.943 1473.803	1 461.870 1 528.609 1 710.984	**
	1-己醇	C111273	1 374.7	955.473	1.334 42	68.192 68.181 79.465	288.774 286.488 286.947	392.797 404.150 376.784	**
	1-戊醇	C71410	1 268.8	762.603	1.258 18	94.560 98.702 107.916	128.037 132.818 128.068	166.441 171.629 162.968	**
	3-甲基-3-丁烯-1-醇	C763326	1 266.8	759.436	1.174 90	71.898 75.564 73.402	83.553 83.500 80.956	41.661 43.794 46.845	**
	3-甲基-1-丁醇	C123513	1 223.5	695.371	1.248 31	48.431 45.536 48.564	349.485 355.226 341.475	445.758 461.929 443.365	**
	1-丁醇	C71363	1 161.9	588.110	1.186 43	127.174 126.632 129.445	222.128 217.618 216.407	246.275 250.754 235.053	**
	2-甲基-1-丙醇	C78831	1 110.8	493.765	1.174 06	54.490 51.953 56.310	149.721 149.248 148.060	162.637 174.430 162.588	**
醇类	乙醇	C64175	945.5	315.184	1.045 87	2 871.523 2 872.969 2 850.245	2 486.023 2 465.079 6 2 461.385	2 257.260 2 268.491 2 271.997	0.69
	乙醇（二聚体）	C64175	946.7	315.973	1.130 75	2 228.212 2 343.297 2 458.919	796.587 832.581 863.406	683.275 712.854 702.249	**
	2-丙醇	C67630	933.0	306.698	1.094 77	156.134 200.137 294.890	209.468 275.525 301.149	298.781 313.032 313.556	*
	1-庚醇	C111706	1 488.9	1 222.970	1.406 75	92.923 88.821 91.903	126.228 132.229 122.724	161.546 156.091 141.516	**
	1-辛烯-3-醇	C3391864	1 490.2	1 226.299	1.165 12	56.563 58.887 61.211	66.914 67.583 68.405	79.450 85.562 81.058	**
	1-戊烯-3-醇	C616251	1 177.8	621.142	0.935 80	61.593 58.069 59.885	82.994 79.305 80.499	89.515 87.799 85.884	**
	1-丙醇	C71238	1 058.3	421.138	1.117 72	58.194 61.298 53.099	171.777 176.617 178.105	219.269 225.414 218.062	**
	2-丁醇	C78922	1 041.5	401.232	1.154 43	26.468 31.147 32.510	40.888 44.012 43.654	48.607 52.253 50.9240	**
	3-甲基-2-丁烯醛	C107868	1 217.5	686.947	1.094 50	158.738 166.572 164.297	85.071 89.964 91.994	87.442 95.196 101.790	**
	己醛	C66251	1 102.1	479.164	1.304 89	41.170 40.579 36.827	51.451 49.371 55.270	55.541 50.322 65.921	**
	2-甲基丁醛	C96173	929.3	304.201	1.193 29	96.091 107.862 114.515	373.231 368.673 368.128	450.344 440.343 4 438.591	**
	丙醛	C123386	817.3	238.209	1.096 48	306.695 324.567 335.870	341.633 366.404 406.126	513.304 561.917 601.661	**
醛类	乙醛	C75070	760.4	210.385	1.027 09	4 958.094 4 875.696 4 879.331	4 362.375 4 614.2305 4 804.578	4 440.464 4 374.328 4 221.218	*
	(*E*)-2-辛烯醛	C2548870	1 442.1	1 105.361	1.335 63	42.410 52.608 45.9160	73.17326 67.905 82.587	77.780 70.378 87.406	**
	壬醛	C124196	1 411.4	1 034.352	1.501 26	71.814 57.056 66.761	71.705 90.786 75.817	84.209 89.812 97.620	**
	3-甲基丁醛	C590863	928.3	303.553	1.393 79	20.570 18.023 17.719	163.074 152.570 153.267	263.834 244.684 232.635	**
	2-甲基丙醛	C78842	832.8	246.409	1.278 89	47.978 49.051 46.229	166.794 167.585 174.923	552.661 544.620 547.584	**

续表3

类别	化合物	CAS号	RI	RT/s	迁移时间/ms	峰体积 A	峰体积 B	峰体积 C	P值
醛类	庚醛	C111717	1 197.5	659.480	1.369 21	51.160 54.494 49.504	43.416 43.719 43.352	39.395 36.664 37.931	0.15
	(*E*)-2-戊烯醛	C1576870	1 151.0	566.706	1.100 09	50.480 53.430 55.057	78.546 78.830 91.799	89.770 102.772 114.532	**
酯类	丁酸乙酯	C105544	1 039.4	398.859	1.198 81	86.975 89.981 88.453	108.025 107.836 109.973	115.905 108.967 108.482	**
	乙酸乙酯	C141786	897.6	283.868	1.099 05	388.609 396.101 408.132	320.932 327.864 349.469	305.420 321.170 349.063	0.45
	乙酸乙酯（二聚体）	C141786	899.3	284.938	1.334 64	91.928 91.843 98.376	45.172 46.023 46.676	27.235 28.355 30.423	**
酯类	己酸甲酯	C106707	1 237.4	715.287	1.292 01	14.657 14.282 14.953	51.879 56.394 54.030	68.407 69.974 72.038	**
	乙酸甲酯	C79209	837.9	249.156	1.195 91	107.902 105.867 109.271	415.939 417.015 420.963	597.364 577.001 550.881	**
	乙酸异戊酯	C123922	1 137.9	541.749	1.300 45	23.429 21.489 23.002	26.991 32.587 21.823	34.720 36.847 36.467	**
酸类	丙酸	C79094	1 637.3	1 685.248	1.122 33	517.163 413.860 404.904	422.154 456.965 474.248	526.819 462.804 517.556	*
	乙酸	C64197	1506.0	1 268.926	1.065 35	3 384.440 3 402.357 3 937.0567	3 327.799 3 325.015 3 260.772	3 454.574 3 251.918 3 347.531	**
	2,3-二甲基吡嗪	C5910894	1 373.1	952.130	1.127 93	167.614 172.175 172.013	184.844 192.780 187.597	112.442 105.119 98.809	**
	2-乙基吡嗪	C13925003	1 354.4	914.618	1.129 64	182.855 189.550 193.593	230.027 242.256 225.383	94.578 95.267 104.865	**
	吡嗪	C290379	1 211.3	678.286	1.273 31	18.132 13.098 15.808	77.477 86.200 76.388	103.841 100.582 99.355	**
其他类	2-乙基呋喃	C3208160	979.6	339.516	1.051 07	140.600 163.187 171.654	192.990 174.916 139.958	132.528 113.776 101.792	**
	2-甲基呋喃	C534225	905.6	288.862	0.983 39	775.925 792.613 809.898	841.641 806.846 785.581	788.345 800.649 829.926	**
	2-正戊基呋喃	C3777693	1245.8	727.724	1.250 06	13.078 15.224 13.382	29.592 27.513 32.059	49.890 36.451 48.247	**
	二甲基硫醚	C75183	791.9	225.367	0.955 98	244.662 243.015 244.231	409.709 404.819 429.652	486.100 472.709 463.802	**

注：*.差异显著（$P<0.05$）；**.差异极显著（$P<0.01$）。

由图4可知，不同基质原料制备发酵乳中样品A酮类占比最高（45.0%），样品B占比次之（36.5%），样品C占比最少（29.0%）。酮类是构成发酵乳风味的重要物质之一，主要来源于原料中不饱和脂肪酸的氧化、氨基酸的降解或发酵菌种的代谢[29]，常见种类有2,3-丁二酮、3-羟基-2-丁酮、2-丙酮、2-庚酮、2-壬酮、2-戊酮等，这些物质在3种发酵乳样品中均被检出。由表3可知，样品A中3-羟基-2-丁酮相对含量最高（（7.48±0.07）%），而2,3-丁二酮相对含量最低（（7.12±0.24）%），这可能是因为2,3-丁二酮不稳定，易被还原为3-羟基-2-丁酮。但随着发酵基质原料中芡实含量的增加，发酵乳中2,3-丁二酮相对含量有所上升，样品B中相对含量比样品A增加了25.56%，样品C中2,3-丁二酮相对含量最高（（9.35±0.08）%）。高含量2,3-丁二酮有助于芡实基发酵乳细腻、浓郁风味的形成[30]。



内环→外环：A→B→C。

图4 不同基质原料制备发酵乳中各类别挥发性风味成分占比

Fig. 4 Proportion of various categories of volatile flavor components in fermented milk prepared with different substrate materials

发酵乳中的醛类是构成其风味的关键羰基化合物，主要来源是原料的各种氧化味。由图4可知，样品C醛类占比最高（22.1%），而样品A占比最少（15.5%）。由表3可知，3种发酵乳中庚醛相对含量无显著性差异，但样品C中乙醛相对含量（（14.51±0.37）%）显著高于样品A，壬醛相对含量（（0.30±0.02）%）明显高于其他2种发酵乳，乙醛是酸奶中重要的抑臭活性化合物，壬醛具有玫瑰、柑橘等香气和强油脂气味，可形成纯芡实植物基发酵乳典型的醛香味。

酸类对发酵乳的滋味和气味都有影响，可赋予发酵乳爽口感和清爽香气。由图4可知，样品C酸类物质占比最高（12.9%），样品A占比最低（10.7%），样品B占比（11.7%）介于两者之间。发酵乳中C_2～C_4酸类一般由乳酸菌代谢产生，由表3可知，3种发酵乳中均检测出乙酸和丙酸。样品A、B、C的乙酸相对含量分别为（9.49±0.61）%、（10.26±0.23）%和（11.19±0.30）%，是主要的酸类物质。丙酸具有酸奶酪味和醋味，样品C丙酸相对含量达（1.68±0.11）%，而样品A和B中其相对含量较低且没有显著差异。研究表明，酸味可能削弱人对发酵乳中奶油味的感知[31]，因此芡实基发酵乳的奶油感相对于牛奶基发酵乳会有所降低。

酯类物质具有果香味和坚果仁味，可较大程度上减少脂肪酸及氨基酸所产生的酸味和苦涩味，同时酯类物质阈值较低，因此对发酵乳风味有促进作用且贡献较大。由图4可知，样品C中酯类化合物占比最高（3.8%），样品A占比最少（1.9%）。3种发酵乳中所检测出的酯类均为分子质量较小的酸类和醇类发生酯化反应生成的低级脂肪酸酯，如乙酸甲酯、乙酸乙酯、丁酸甲酯等。由表3可知，乙酸乙酯的相对含量在3种发酵乳

中没有显著差异，但样品C中乙酸甲酯相对含量是样品A的6.62倍，也比样品B高47.69%，表明芡实基发酵乳更具水果香味。

发酵乳中醇类主要由糖类的乳酸菌发酵及脂肪酸、甲基酮等降解产生。由图4可知，样品A、B、C醇类物质占比均较高，分别为20.0%、20.8%、23.0%。由表3可知，3种发酵乳中乙醇相对含量均在7.60%左右且没有显著差异，乙醇含量过高不利于发酵乳的品质，醇香与乳香平衡才更有利于发酵乳整体风味。样品C中具有特殊香甜味的3-呋喃甲醇、威士忌酒香的3-甲基-1-丁醇以及果味的1-己醇（气味描述主要来源于网站http://www.odour.org.uk），其相对含量均高于样品B，且显著高于样品A，可见植物基原料能让发酵乳的风味更加丰富和立体。

呋喃类物质也是发酵乳中重要的挥发性风味物质。由表3可知，样品A、B、C中呋喃类物质占比分别为5.23%、6.24%、6.57%，3种发酵乳中均检测到2-乙基呋喃、2-甲基呋喃和2-正戊基呋喃。样品A、B、C中均检测到具有坚果香味的吡嗪类物质（占比分别为0.99%、1.55%、1.02%），如吡嗪、2,3-二甲基吡嗪和2-乙基吡嗪。其中，样品C中吡嗪相对含量最高（（0.34±0.01）%），样品B中2,3-二甲基吡嗪和2-乙基吡嗪相对含量最高，分别为（0.58±0.01）%、（0.72±0.03）%。这些挥发性成分主要源于芡实的原料特性以及乳酸菌的发酵过程[6]，有利于芡实基发酵乳产品独特风味和品质的形成。含硫有机化合物不仅是发酵乳中的特征风味物质，也是重要的生物活性物质。样品C中二甲基硫醚相对含量为（1.58±0.03）%，样品B中其相对含量为（1.29±0.03）%，样品A中其相对含量仅有（0.65±0.01）%。常见市售发酵乳中也基本都能检测出二甲基硫醚，其含量与硫味呈极显著正相关[32]，而硫味会令人不愉快，因此如何兼顾生物功效和风味口感，既能迎合现代消费者的养生追求又能满足其嗜好需求，是植物基发酵乳亟需解决的一个关键问题。

2.4　挥发性风味物质层次聚类分析

对不同基质原料制备发酵乳中挥发性风味物质进行HCA，结果见图5。根据左侧树形图分支的远近，可以看出样品B和C的相似度更高，这与指纹图谱的分析结果一致。根据顶部树形图分支的远近可将挥发性风味物质分为3类，I区挥发性风味物质主要出现在样品C中，II区挥发性风味物质主要出现在样品A中，III区挥发性风味物质主要出现在样品B中。

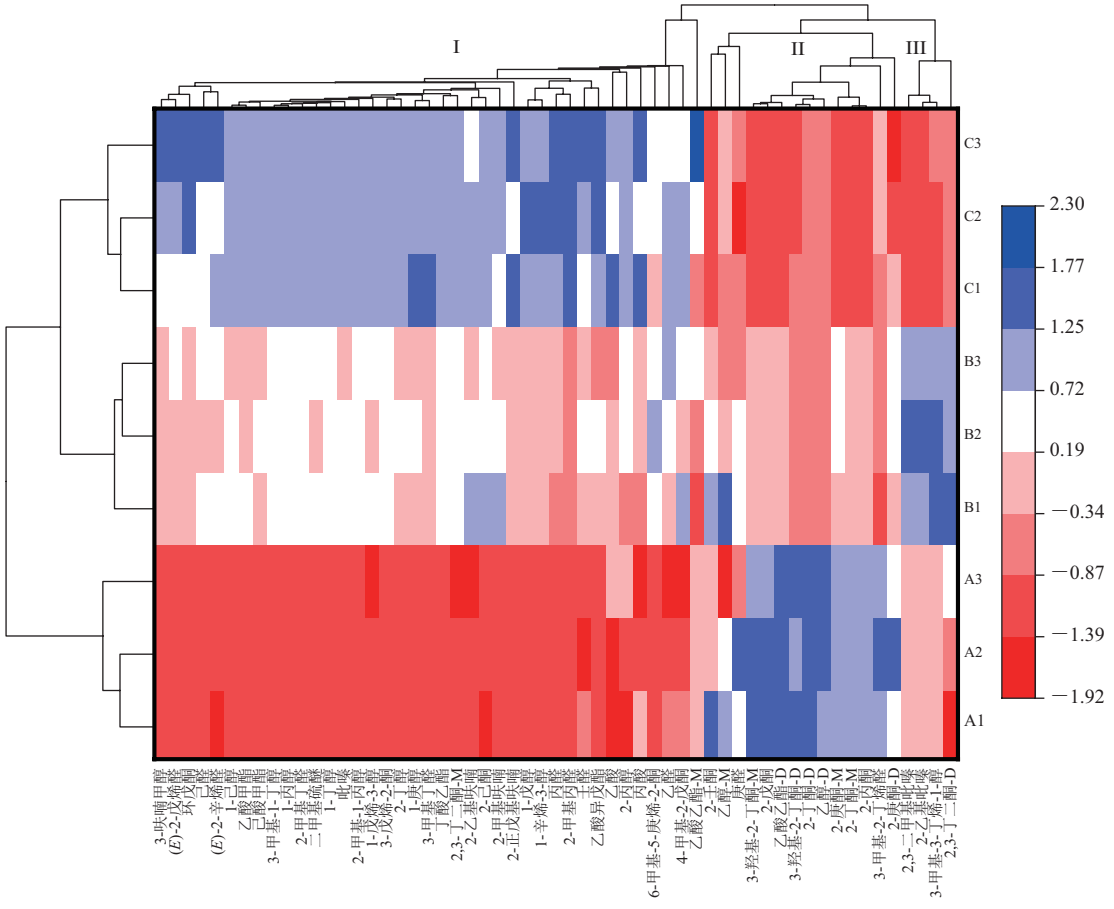


图5　不同基质原料制备发酵乳样品中挥发性风味成分含量HCA热图

Fig. 5　HCA heatmap of volatile flavor components contents in fermented milk prepared with different substrate materials

2.5　挥发性风味成分PCA

由图6可知，PC1方差贡献率为78%，PC2方差贡献率为11%，累计方差贡献率为89%，且不同种类发酵乳样品不重叠，表明PCA能很好地区分和表征3种发酵乳的风味特征。样品B和C之间相距较近，均与样品A距离较远，这说明芡实牛乳基发酵乳与芡实基发酵乳风味更相近，且与牛奶基发酵乳差异明显，体现出不同基质原料所导致的风味成分的较大差异。

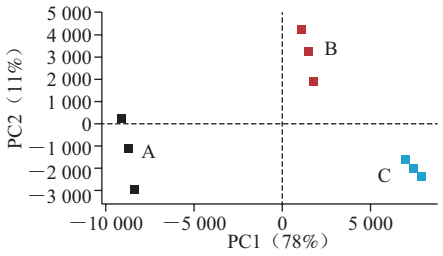


图6　不同基质原料制备发酵乳挥发性风味成分PCA得分图
Fig. 6　PCA score plot of volatile flavor components in fermented milk prepared with different substrate materials

2.6　挥发性风味成分OPLS-DA

由图7a可知，自变量解释率R_X^2、因变量解释率R_Y^2分别为0.966和0.999，模型预测指数Q^2为0.98，均表明模型拟合结果合理且可靠[33]。当R^2和Q^2为0.5～1.0时，表明模型有较好的概括解释率和预测率，模型模拟结果可接受。由图7b可知，经200次置换检验，Q^2回归线与纵轴的相交点为−0.744，Q^2回归线与纵轴的相交点小于0，表明模型不存在过拟合，模型验证有效[34]，可用于不同基质原料发酵乳挥发性成分区分。由图7c可知，筛选出VIP＞1且P＜0.05的关键差异化合物18种，分别为2-丙酮、乙醇（二聚体）、3-羟基-2-丁酮（二聚体）、2,3-丁二酮（二聚体）、2-甲基丙醛、2-丁酮（二聚体）、2,3-丁二酮、3-羟基-2-丁酮、2-乙基吡嗪、乙酸、3-呋喃甲醇、乙酸甲酯、丙醛、乙醛、2-丁酮、3-甲基-1-丁醇、2-甲基丁醛、2,3-二甲基吡嗪。OPLS-DA可有效区分不同基质原料制备发酵乳。

3　结　论

采用GC-IMS技术结合指纹图谱、聚类热图、PCA及OPLS-DA对3种不同基质原料制备发酵乳挥发性风味物质进行检测和差异分析。3种发酵乳样品中共检出51种挥发性风味成分，包括酮类12种、醇类14种、醛类11种、酯类5种、酸类2种及其他类7种。结果表明，基质原料不同，发酵乳挥发性风味成分差异明显，其中芡实基发酵乳中醛类、酸类、醇类、酯类和其他类相对含量均最高，这些风味物质相互作用使得芡实基发酵乳的风味更独特。根据OPLS-DA模型，筛选出18种

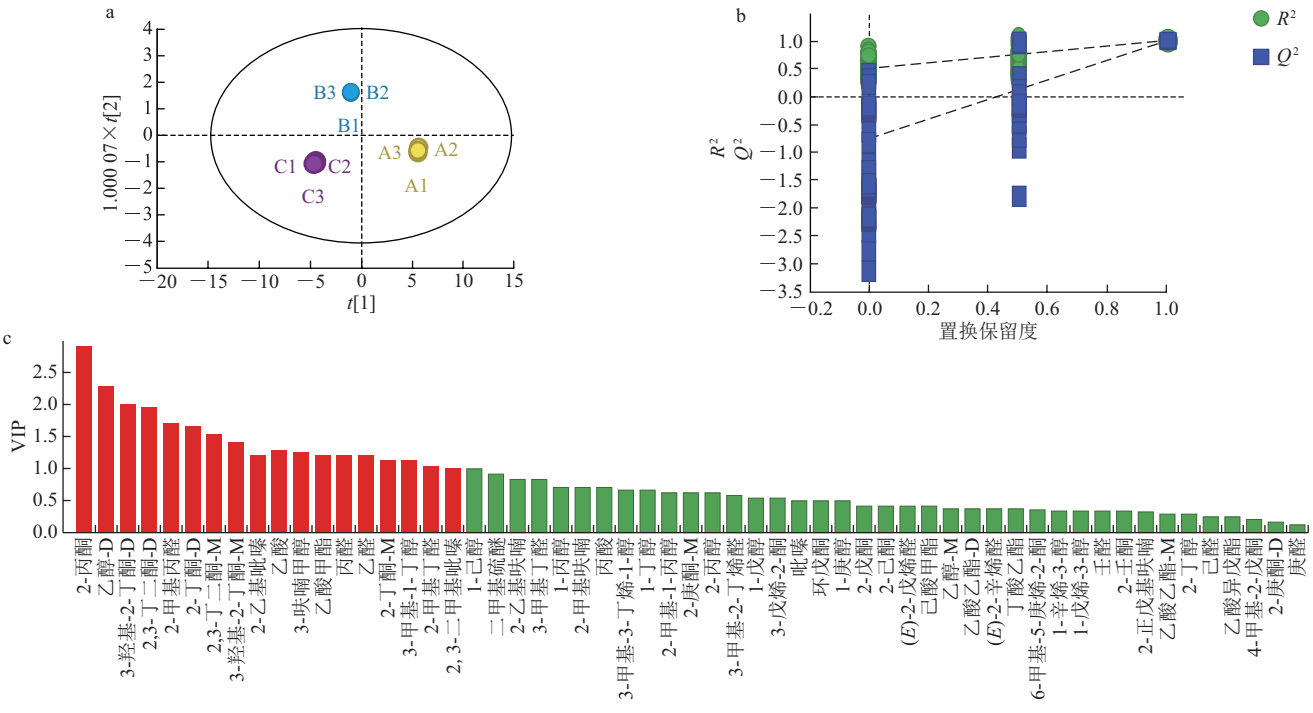


图7　不同基质原料制备发酵乳挥发性风味成分OPLS-DA得分图（a）、置换检验结果（b）和VIP值（c）
Fig. 7　OPLS-DA score plot (a), permutation test result (b) and VIP value (c) of volatile flavor components in fermented milk prepared with different substrate materials

影响不同基质原料制备发酵乳风味的关键差异化合物（VIP＞1、P＜0.05）。该研究结果可为芡实基发酵乳风味调控提供科学依据。

参考文献：

[1] 陈翠翠, 孙金威, 刘绒梅, 等. 无添加发酵乳发酵工艺的优化研究[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(12): 66-71.

[2] ZHANG K Y, LIU S B, TANG H W, et al. Effect of exopolysaccharides yield and addition concentration of lactobacillus helveticus on the processing characteristics of fermented milk and its mechanism[J]. Int J Biol Macromol, 2024, 260: 129480.

[3] 刘瑾萱, 张雅媛, 李春梅, 等. 植物基酸奶制备及品质改良方法的研究现状[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(8): 115-124.

[4] 何巧艳. 燕麦发酵乳的制备及品质改良研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024.

[5] YIN X Y, LI J X, ZHU L, et al. Advances in the formation mechanism of set-type plant-based yogurt gel: a review[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2024, 64(26): 9412-9431.

[6] 马晓艳, 万霞, 陈亚淑, 等. 植物基发酵乳的研究和应用进展[J]. 食品科学, 2024, 45(20): 320-335.

[7] KUMARAN A, KANNAN D, VENKATESAN S, et al. Development of novel fermented almond milk tea and it's evaluation as antidiabetic drink[J]. J Pharm Res Int, 2021, 33(2): 75-87.

[8] MCGORRIN R J. Key aroma compounds in oats and oat cereals[J]. J Agric Food Chem, 2019, 67(50): 13778-13789.

[9] 张余, 杨心怡, 石玉琪, 等. 球磨处理对芡实粉微观结构和糊化性质影响[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(2): 99-107.

[10] 廖树红, 张国良, 黄志炜, 等. 芡实加工及有效成分提取研究进展[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(7): 142-150.

[11] 李冬琴, 耿敬章, 吴云霞, 等. 芡实主要成分研究进展及其质量标志物预测分析[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(9): 31-34.

[12] 袁梦, 刘晓倩, 张浩, 等. 芡实膳食纤维的结构、理化和功能特性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 151-161.

[13] 马恺阳, 胡新中. 燕麦植物基酸奶生产工艺优化及产品特性[J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 184-191.

[14] CODA R, LANERA A, TRANI A, et al. Yogurt-like beverages made of a mixture of cereals, soy and grape must: microbiology, texture, nutritional and sensory properties[J]. Int J Food Microbiol, 2012, 155(3): 120-127.

[15] 付荣霞, 高桂彬, 崔艳, 等. 山药薏米芡实褐色酸奶生产工艺研究[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(8): 53-56.

[16] 王倩, 程永惠, 杨佳怡, 等. 热处理芡实在凝固型酸奶中的应用研究[J]. 农产品加工, 2025(11): 26-29.

[17] 李宏强, 王宏博, 杨晓玲, 等. 牦牛乳及乳制品中挥发性风味物质的研究进展[J]. 中国草食动物科学, 2023, 43(1): 43-47; 63.

[18] 冀权, 马金梅, 张海燕, 等. 基于GC-IMS分析比较不同类型原乳与发酵乳的挥发性物质成分[J]. 中国乳品工业, 2024, 52(9): 34-41.

[19] 潘海峰, 鲍文娜, 廖鸿秀, 等. 西兰花酸奶的抗氧化活性及其风味特征研究[J]. 中国乳品工业, 2024, 52(4): 38-44; 49.

[20] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 发酵乳: GB 19302—2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.

[21] 郑丽敏, 徐紫薇, 丁琳, 等. 花生基发酵酸奶的工艺优化[J]. 食品工程, 2023(4): 26-30.

[22] 郭帅, 韩之皓, 白梅, 等. 嗜热链球菌S10复合植物乳杆菌P-8发酵豆乳中挥发性风味物质的SPME-GC-MS分析[J]. 中国食品学报, 2020, 20(10): 268-279.

[23] 岳杨, 汪超, 陈亚淑, 等. 植物乳的香气、异味及其影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 330-340.

[24] 马杰, 周建中, 张婷, 等. 基于气相离子迁移色谱结合感官评价法对植物基杏仁酸奶挥发性风味物质的表征及分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(20): 280-287.

[25] ZHAO G Z, DING L L, HADIATULLAH H, et al. Characterization of the typical fragrant compounds in traditional Chinese-type soy sauce[J]. Food Chem, 2020, 312: 126054.

[26] 申梦娜, 乔海军, 张卫兵, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱的市售酸奶挥发性风味物质差异分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(19): 242-249.

[27] CHEN C, ZHOU W Y, YU H Y, et al. Characterization of major odor-active compounds responsible for nutty flavor in Cheddar cheese according to Chinese taste[J]. Flavour Frag J, 2020, 36(2): 171-181.

[28] WANG H, WU B, ZHANG J, et al. Bamboo shoots improve the nutritional and sensory quality, and change flavor composition of chicken soup[J]. Food Chem: X, 2024(1): 101140.

[29] 郝秋月, 岳旭良, 樊凡, 等. 发酵乳风味物质生成机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(20): 157-166.

[30] DUAN W H, GUAN Q J, ZHANG H L, et al. Improving flavor, bioactivity, and changing metabolic profiles of goji juice by selected lactic acid bacteria fermentation[J]. Food Chem, 2023, 408: 135155.

[31] MU S, LIU L, LIU H N, et al. Characterization of the relationship between olfactory perception and the release of aroma compounds before and after simulated oral processing[J]. J Dairy Sci, 2021, 104(3): 2855-2865.

[32] 郭奇慧, 高秀兰, 雷守成, 等. 搅拌型酸奶感官评价与仪器测定间的相关性研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(19): 65-69.

[33] YUN J, CUI C J, ZHANG S H, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea[J]. Food Chem, 2021, 360: 130033.

[34] 邵淑贤, 徐梦婷, 林燕萍. 基于电子鼻与HS-SPME-GC-MS技术对不同产地黄观音乌龙茶香气差异分析[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 232-239.